

第5章 資料のデジタル化と活用の方法

1. 時空間情報科学と研究の枠組み

コンピュータを活用した時空間情報科学は、歴史学をはじめとする人文科学の研究方法について、その枠組みの総体を大きく変える可能性がある。GIS（地理情報システム）や GPS（全地球測位システム）の本格的利用が、考古学の分野においても「100年目の大変革」をもたらすという予測もみられる（宇野2006）。ここでは、そうした研究の枠組みについて検討したうえで、研究の最も基本となるデータの取得の方法について、現在の到達点と展望をまとめてみたい。

初期の段階における考古学の研究の手法は、遺跡や遺物などを記録し、それを解釈するという、いわば二層構造をもっていた。その後、詳細な編年や分布論が発達し、遺跡や遺物の記録と解釈との間を取り結ぶ研究法が充実していった。一方で「新しい考古学（New Archaeology）」を標榜するルイス・ビンフォードは、考古記録のパターンを当時の人間行動という脈絡に変換していく方法論が必要であることを強調し、その方法論的体系をミドルレンジセオリー（中範囲理論）と呼んだ（阿子島2004）。記録と解釈との間において、編年や分布とは別に人間行動のパターンを整理することが重要であると考えたのである。このようにして、考古学研究の体系が三層構造として認識されるようになってきた。

いま考古学は、自然科学的手法と人文主義的な手法との間を揺れ動いている。これはもちろんポストモダンの影響であり、1980年代から台頭した「ポストプロセス考古学」の潮流と深いかわりをもっている。パターンを統計的手法などを用いて分析しようとしたビンフォードらのプロセス考古学を批判し人間の意識などのような法則化しにくい要素を強調したイアン・ホッダーらの研究が世界の考古学を揺るがし、人間の意識の部分を科学の名のもとに意図的に拒絶してきた伝統的な考古学の枠組みに対して、それを広げることになったのである。

プロセス考古学は、当時ようやく利用が可能になったコンピュータを駆使することも特徴の一つであったが、それを批判した「ポストプロセス考古学」は、コンピュータの使用に対しても異なった姿勢をみせた。環境変動などの解析よりも、当時の人間が景観をどのように認知していたかというような、空間的にはミクロな解析に関心を集中させたのである。プロセス考古学の伝統のみられるアメリカに対して、地理情報システムの利用の面においても、ヨーロッパは独自の歩みを進めることになっていった。

しかし、「ポストプロセス考古学」の台頭からすでに四半世紀が経過し、考古学を取り巻く環境は大きく変わってきたように感じられる。当初はホッダーらが広げた新しい領域に、とくに若手の研究者の関心が集中していたのであるが、この間に蓄積されてきた情報科学的なデータと研究手法の魅力が大きく拡大し、いまいちど考古学の研究方法の枠組みの総体を再構築しようという動きが随所で生まれてきているように思われるのである。やや脇に追いやられていた感のある政治や経済をはじめとする分野と自然科学的な手法が復活のきざしをみせているともいえるであろう。

こうした動きを最もよく示しているのは、考古学の分野におけるシミュレーションの発達である。アメリカでは、ブルッキングス研究所やサンタフェ研究所を中心とするグループが、「人工社会」などの学際的研究の成果をふまえて、ネイティブ・アメリカンのプエブロ族の歴史を考古学的シミュレーションで復元するなどの先駆的研究が進められている（Kohler, Gumerman and Reynolds 2005）。考古学も自然科学の手法と同じように、シミュレーションによって再現できない解釈は科学とはいえ

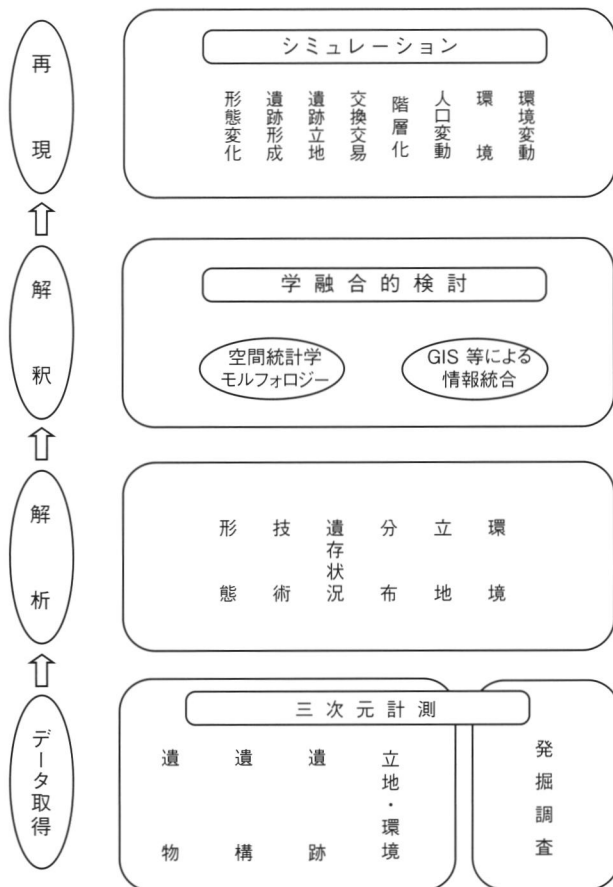


図1 時空間考古学の構造モデル

ないという動きが強まってきているのである。

ここでは、考古学の研究法の枠組みを時空間考古学を例にとりて、図1のような構造モデルで考えてみたい。従来の三層構造の研究手法に対して、その上にシミュレーションを重ねた四層構造を考えるのである。

こうした構造モデルのなかで、本稿で取り上げようとするのは最も下層に位置づけられる、データ取得の方法である。遺物や遺構に対する実測の手法に変化のきざしが現れ始めたのは、せいぜい10年前のことであり、従来型の実測図・測量図に対して三次元計測の優位性が確認できるようになったのは、ごく最近のことである。他から提供されるデータではなく研究者自身が取得したデータによって、地理情報システムを用いた解析を行うことのできる条件が、急速な勢いで整備されてきており、それが研究手法全体に大きな影響を与える可能性が強まってきている。この段階で、そうした

観点から現状での技術的な到達点と可能性を整理しておく必要があると考えるのである。

2. 遺物の三次元計測

筆者が三次元計測の優位性を最初に実感したのは、2006年6月に兵庫県権現山51号墳出土三角縁神獣鏡2号鏡（近藤編1991）の一部を、接触式の三次元計測装置（ローランド・ディージー製 PIX-30、図2）を用いて計測したときである。この装置は、たいへん鋭敏な「ピエゾセンサー」という針のようなものを動かして接触した針の先の位置を計測するもので、粘土や果物などの柔らかいもので

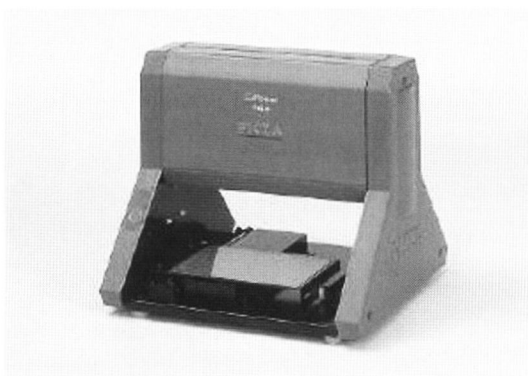


図2 接触式三次元計測装置

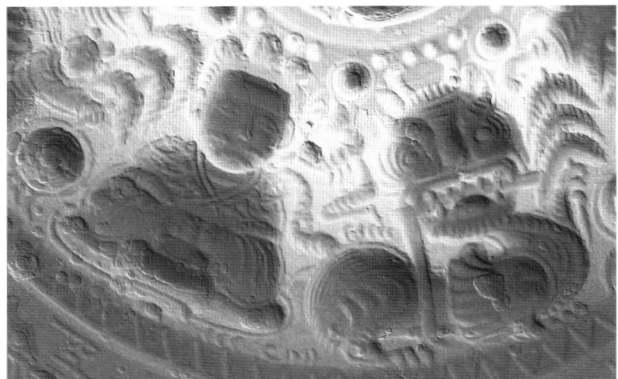


図3 三角縁神獣鏡の文様

も計測できるということであり、同志社大学の津村宏臣さんの協力を得て計測を行った。計測結果の画像がコンピュータの画面に表示された瞬間、思わず声を上げてしまうほどの精細さであった(図3)。

水平方向の間隔は、最高精度で0.05mmであり、高さは0.025mm刻みで計測される。1mmの間に20点の計測点があるため、かなりの精度である。計測データにもとづいて傾斜がきつい部分を暗く表現するように設定して画像を表示すると、ある意味で実物を見るよりも詳細に文様の細部を理解することができた。高さが0.025mm刻みであることから、若干の縞模様がみられるものの、三次元のデータから起こしているとはとても思えないほどの画像であった。また、装置の価格が数十万円であることも魅力であったが、残念ながら製造中止となってしまった。

さらに、最大の難点は時間がかかることで、幅7.5cm程度のこの図の範囲を計測するのに4日ほど必要となる。もちろん、計測開始後は放置しておけばよいのであるが、それでも時間がかかりすぎるというのが正直な感想であった。また、いかに繊細なものであるとはいえ、遺物の表面に針の先が直接接触するというのも、抵抗のあるところであった。その他、三次元計測といっても、あくまで一方向からの距離を測定できるというわけであり厳密な意味での三次元ではないということも問題ではあった。

接触式に代わって普及してきているのが、レーザー式の三次元計測装置である。同じように三角縁神獣鏡の計測を行い、結果の計測点をプロットして精度を比較してみた(図4)。プロットされた計測点の特徴は、計測点が格子状に並ぶ部分と入り乱れる部分があることと、計測されていない白く抜けた部分が存在することである。これは、鏡を狭い部分に分けて計測しそれを合成していることと、レーザーをうまく反射しない部分があることが原因である。合成の際に重なり合っている範囲が、格子状にみえない部分である。業者に発注して計測を行う場合は、ノイズの除去や欠測部分の補間をソフトウェア的に行ってしまうので注意が必要である。

レーザー式の大きなメリットは、ほぼ完全な三次元計測が可能であることと、計測時間が著しく短いことである。日本製の装置は、コニカミノルタ製の三次元デジタル計測装置である Vivid シリーズが知られており、図4のデータも Vivid での計測である。



図4 三角縁神獣鏡のレーザースキャン



図5 レーザー式三次元計測装置

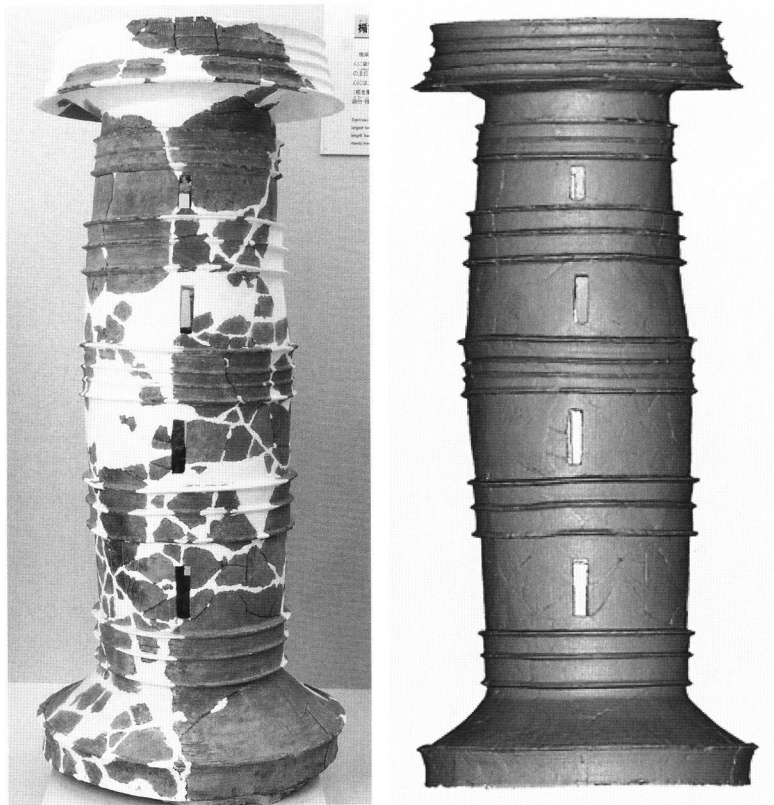


図6 特殊器台形土器の写真と三次元計測による復元

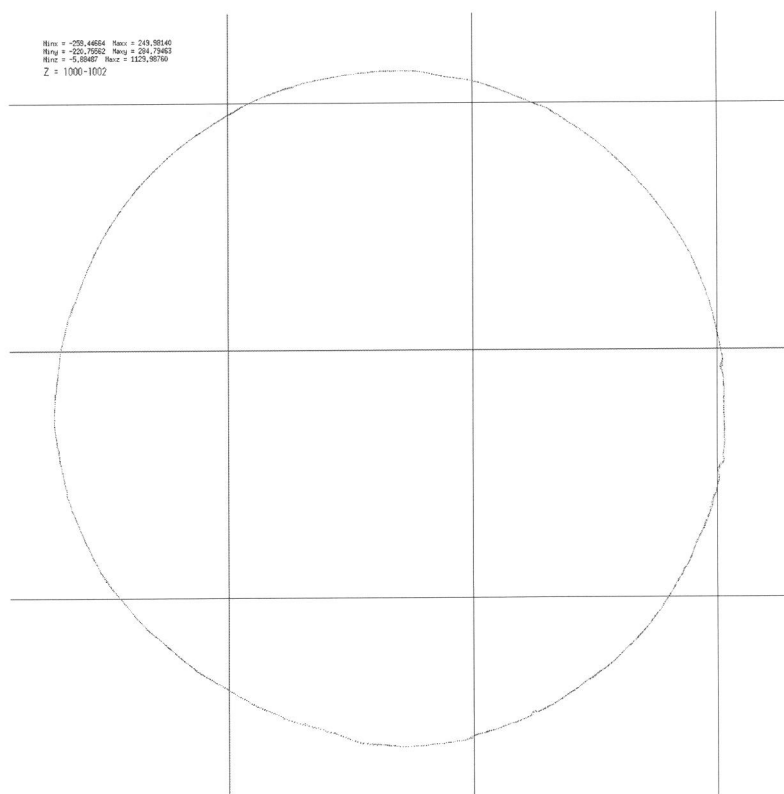


図7 特殊器台形土器の断面プロット

Vivid の最新機種は Vivid9i (図5) であるが、新しい高位機種がまもなく提供されるそうである。価格は周辺機器もそろえると500万円を超えるが、装置は比較的コンパクトで扱いやすい。昼間の屋外での計測は困難であり、遮蔽と人工光線が必要である。

銅鏡のような黒い部分が多い遺物は欠測が多いということであり、2007年3月に、西部技術コンサルタント株式会社および有限会社アイテックに依頼し、岡山県榑築弥生墳丘墓（近藤編1992）出土の特殊器台形土器および人形土製品の計測を実施した。特殊器台形土器は、後述するニコン・トリンブル社製の三次元スキャナ Trimble GX 3D Scanner と Vivid9i を併用し結果を対比させることにした。

Trimble GX 3D Scanner は、比較的遠距離の計測を得意とするものであり、結果として高さ112cm程度の大きめの遺物であってもあまり適していないことが判明した。

Vivid9i の精度を確認するため、計測されたデータのなかから一定の高さの部分で輪切りにした輪郭の画像を表示するため、高さ2mmの範囲のものを抽出し、その平面形をプロットしてみた（図7）。結果は、プロットされたドットの分布にそれほど厚みがなく、比較的良好に計測が行わ

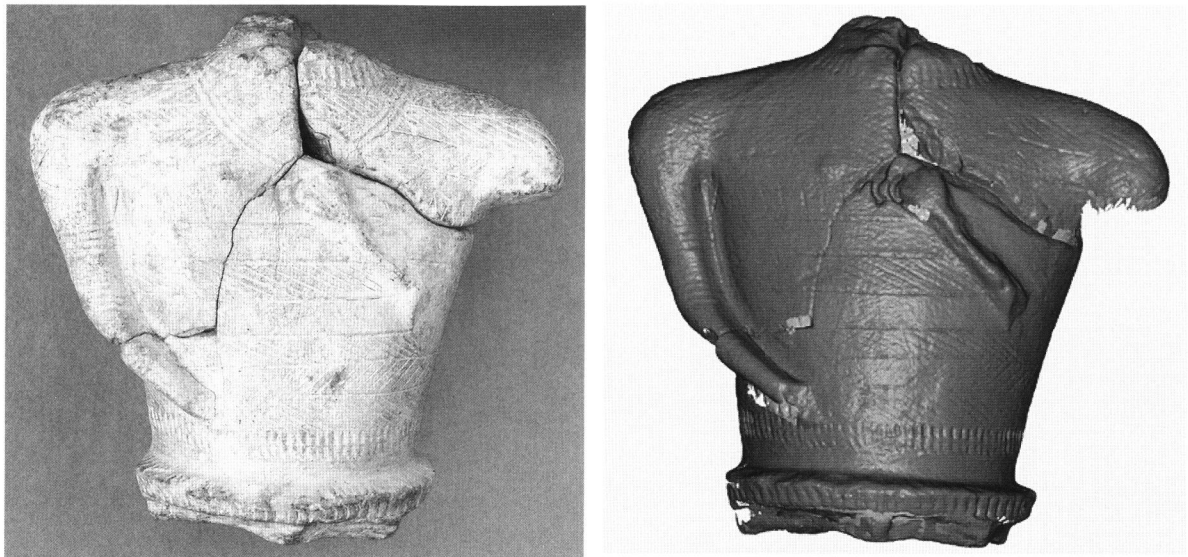


図8 人形土製品の写真と三次元計測による復元

れているということを確認できた。この精度であれば、実測を行う場合でも、この図をもとにするほうがはるかに正確であるということができる。計測が難しい大型の遺物などには、積極的に適用するべきであろうと考えられる。

人形土製品の計測は、Vivid9iで行った。当日は補足的な計測という位置づけであったため、時間の制約があり必ずしも十分な計測とはならなかったが、当面の検討には十分なものであった。この人形土製品は、高さ9.5cmという小さなもので、綾杉文と呼ばれる斜線を組み合わせた細かい文様が施されており、その文様をどこまで表現できるかがひとつのチェックポイントとなった。

結果として、外形や文様の位置などについては大いに実用的な段階に達しており、実測の補助的な手段としてはきわめて有効であることが確認できた。一方で、遺物のもつ表面の質感については、全体にヌメツとした表現であり、三角縁神獣鏡の接触式の計測には遠くおよばないことが感じられた。Vividは、さまざまな方向から計測を行い重なる部分にもとづいて全体をつなぎ合わせるという方法をとっているため、一定のスムーthingの処理が行われているようであり、それが表面の質感に現れている可能性がある。計測の後処理がブラックボックスとなっているために、原因を絞り込むことが現状では困難といわざるをえない。

そうした問題があるものの、全体としては実用の域に達してきているので、より困難な条件のもとでの計測を試みることにした。資料は広島県福山市二子塚古墳出土双竜環頭大刀の環頭（畑・高田編2006）で、今回も計測は西部技術コンサルタント株式会社および有限会社アイテックである。環の長径7.8cmという小さな遺物であり、さらに鍍金が施されているためレーザーをはじく可能性があることが懸念された。この資料には、環の外周に一對の竜が絡み合う表現があるが、文様が退化しており意味がよくわからない部分も少なくない。しかし逆に、それを利用すると文様の退化の過程から年代を推定することが可能になるという利点をもっている。いずれにしても、双竜環頭のなかでは古式のもので、それぞれの竜が玉をくわえているたいへんに珍しい資料である。

計測は、2007年7月9日に福山市教育委員会で実施した。計測結果は、事前に予想したように鍍金のせいかノイズが多く、ノイズの除去などの後処理に手間がかかったということである。ノイズを除去した上で、表面に写真をかぶせて表現したものが図9右の画像である。これは、コンピュータ上で

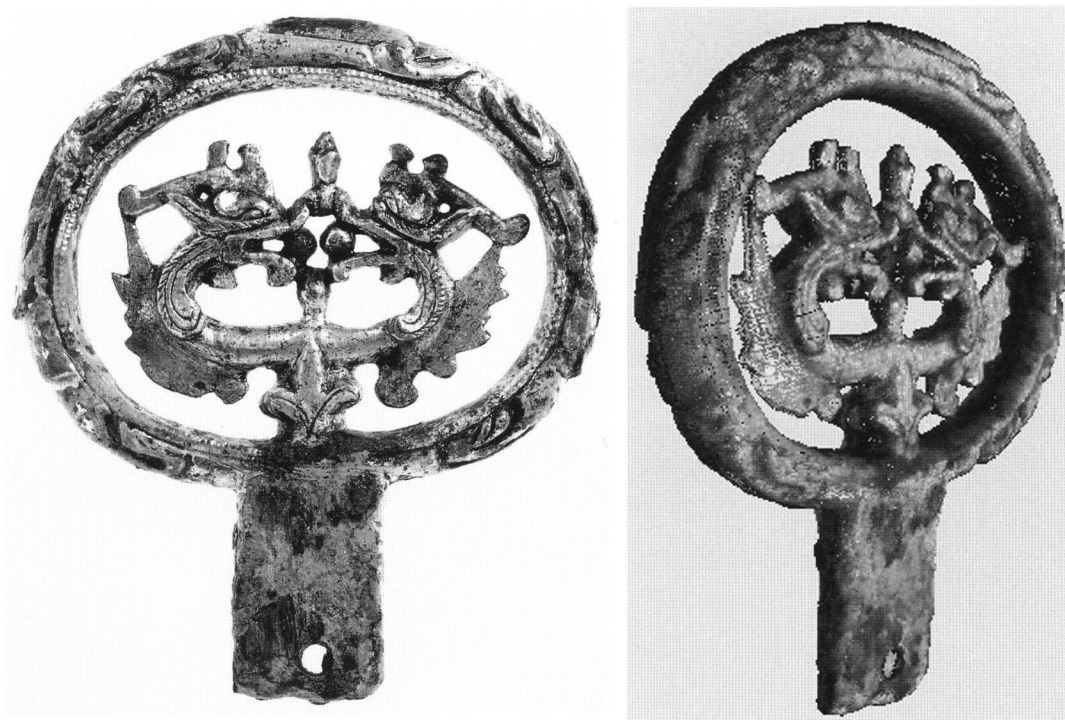


図9 広島県福山市二子塚古墳出土双竜環頭の写真と三次元計測による復元

は自由に回転させることができ、環周の文様も必要な部分を自在に検討することができる。そうした点ではたいへん便利であるが、環の内側に近い部分にみられる刻み目が十分には観察できないなど、不満を感じる部分も少なくない。全体としての評価は、実用のためにはボーダーラインに位置するといえることができるであろう。

以上のように、遺物の三次元計測は、一部で実用の域に達しているものの全体としてみると改善の余地が少なくないという段階にあるといえるであろう。レーザーによる計測という手法自体が、精度の点では技術的にあまり「のびしろ」のないものであるという声もあり、慎重に状況を見極めていく必要があるように感じられる。

3. 遺跡の三次元計測

屋外の大きな対象物に対する三次元計測は、遺物の場合とは異なった性格をもっている。樹木・下草・落ち葉など対象物の表面に影響を与えるものが少なからず存在することや、人間や動物、場合によっては通行する自動車なども記録されてしまうこと、光線のコントロールが必要な場合はそれが難しいことなどがあげられる。しかし、遺物にくらべて遺跡は破壊や改変の危険性があるため、三次元計測のもつ意味はいっそう大きい。熱帯雨林地域の石造建造物などは、可能な限りすみやかに三次元計測を行っておく必要があるだろう。

一般的な遺跡と遺物の中間的な大きさの対象物として、2006年9月7日・8日に岡山市造山古墳の前方部に置かれている刳拔式石棺の三次元計測を実施した。この石棺は造山古墳の前方部から出土したとも近くの車塚古墳から出土したものを移動したともいわれている。熊本県の阿蘇熔結凝灰岩製で、手水のための容器として用いられてきたようであり、水量を調節するために孔がけられている。側面には手水の容器として用いられた際に文字が刻まれている可能性があるが判然としない。文字が確認できれば手水の容器に転用された時期を確認できるかもしれず、出自を検討するための参考となる

かもしれない。また、石棺自体はやや斜めに置かれているので、一般的な方法では実測が難しく、三次元計測にもとづいて水平に回転させた図面をもとに実測図を作成できる点が便利である。

計測は、西部技術コンサルタント株式会社に依頼し、ニコン・トリンブル社製の三次元スキャナ Trimble GX 3D Scanner を用いて行った(図10)。発電機を用いることができるので、電源のない場所でも計測ができる。位置情報とともに色情報も記録できるので、写真などをかぶせる必要がないこともメリットである。計測は、指定の間隔でレーザーをややゆっくりと走らせていくことになるので、ひとつの方向からの計測に数時間を要した。図10にみられるように対象物の周囲に数カ所の白い球を設置し、計測の方向を変えた場合にその球の位置によって座標系を対応させるという方法をとっている。球の中心はどの方向からみても同じ位置にくるからである。

計測の精度を確認するために、石棺の断面を1cmの厚さで輪切りにしてプロットしてみた。図11の下は石棺の断面で、上は右上の端部を拡大してみたものであるが、断面はあまり美しい線にはなっていない。可能性としては、比較的凹凸の激しい対象であるので1cmの厚さが影響を与えていることと、複数の角度からの測定値を合成しているので著しく斜めから計測した場合には誤差が大きくなること、機械そのものの持っている誤差などが考えられる。

原因を絞り込むためには、表面の凹凸がそれほど著しくない対象物で検証を行うことなどの取り組みが必要であるが、当面はこの程度の誤差があってもそれをもとに実測図を作成していくならば、よりレベルの高いものとなると考えられ、条件つきではあるが有効性は十分存在していると考えられる。

三次元計測のさまざまな試行をふまえて、一定程度本格的な適用を試みたのは、2007年3月から4月にかけて実施した、岡山県倉敷市勝負砂古墳の発掘調査(担当 松木武彦)に伴う計測である。勝負砂古墳の竪穴式石室は未盗掘であることから、可能な限り周到な方法で計測を行うため、岡山大学学長裁量経費・教育研究プロジェクトの経費を使用し、西部技術コンサルタント株式会社および有限会社アイテックに作業を依頼した。発掘調査と平行したリアルタイムの計測は初めての経験であり、今後の活用を考える上でも重要な試みとなると考えたからである。

計測は、石室の天井石の除去前と、除去後の副葬品の出土状況、および副葬品の取り上げ後の床面検出状況の、大きく分けると3回に分けて行われた。発掘区の全体は Trimble GX 3D Scanner を用



図10 造山古墳前方部石棺の三次元計測

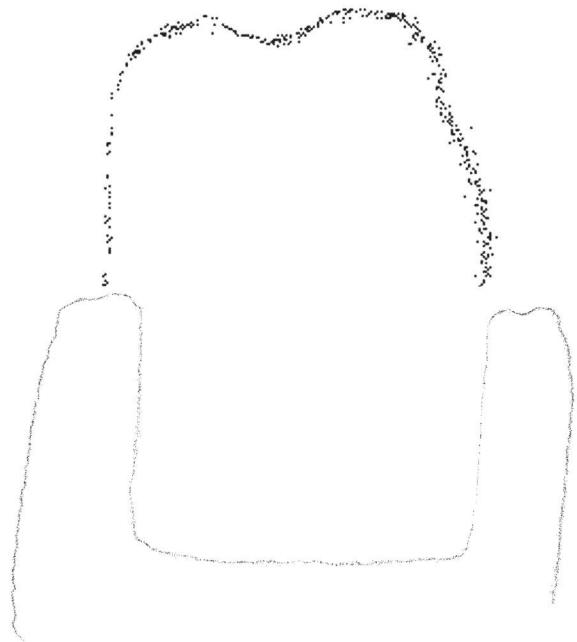


図11 石棺断面計測ポイントのプロット

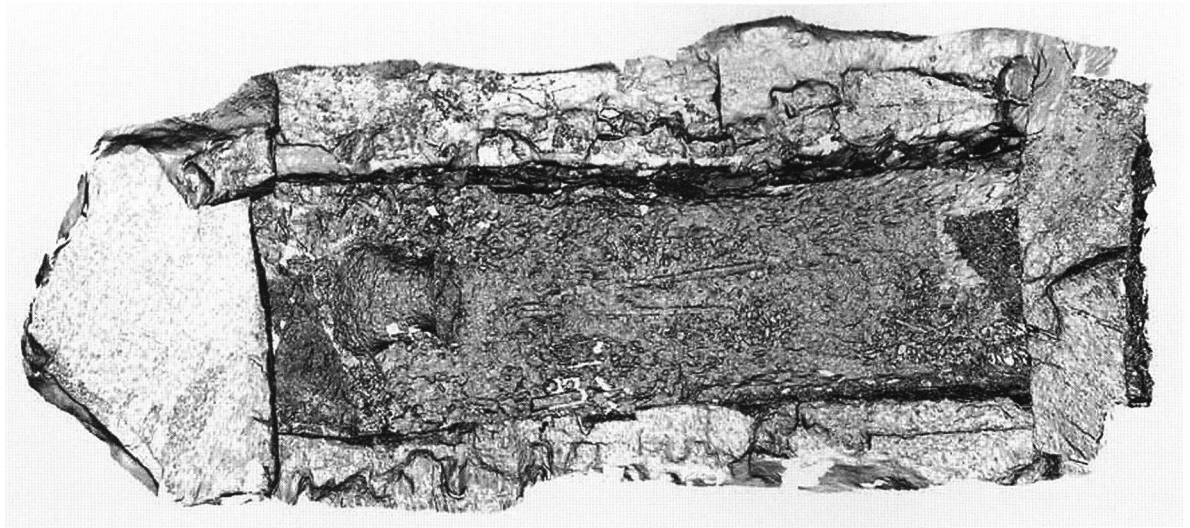


図12 岡山県倉敷市勝負砂古墳の竪穴式石室の三次元計測による表示

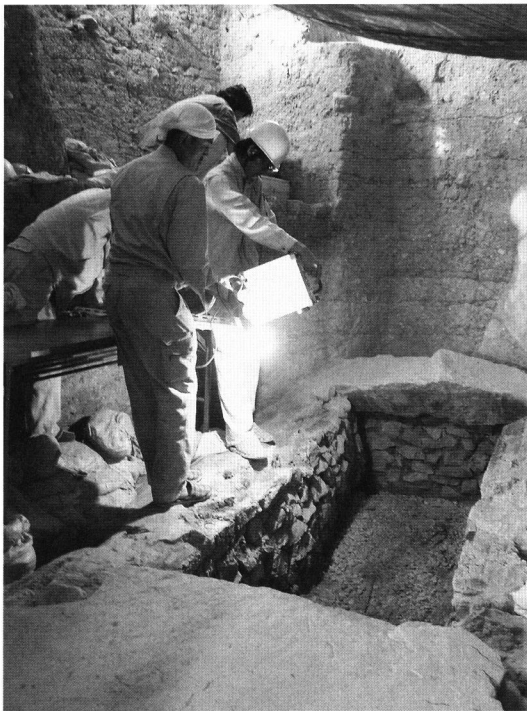


図13 勝負古墳石室の計測風景

いて計測し、石室は Vivid9i を用いた。Vivid は太陽光線の影響を受けるので、発掘区全体を黒い布で遮蔽し、夕刻以降に計測した。Vivid は一回の計測がきわめて短時間で可能であるため、机の上に機械を乗せる装置を工夫し、場合によっては手持ちで計測した（図13）。

図12は、石室を三次元計測のデータによって復元し写真を貼り合わせたもので、これは真上からの図となっているが、自由に回転させて表示することができる。しかし、計測点がきわめて多いことから、通常のパーソナルコンピュータで迅速・自在に表示できるというわけではない。

計測の結果は、精度的には十分実用に適するものであると思われるが、計測データを合成すると莫大な大きさとなり、現状では小回りよく自由に研究に利用できるという状況にはいたっていない。また、多くの副葬品が重なり合って出土したが、それを随時計測するという形をとることはできなかった。三

次元計測の有効性が十分に確認され処理の方法にも慣れてくれば自前で機械を備えて必要に応じて計測するということも可能になるであろうが、計測後の処理の労力を考えると、検討しなければならない課題は少なくないといえるであろう。

岡山市造山古墳のデジタル測量調査は、すべてを我々の手で実施した三次元計測である。もともと1998年頃から倉敷市天狗山古墳の発掘調査に際して、50cm間隔のメッシュで墳丘の標高を計測するという作業を進めており、等高線測量とは異なったデジタル測量を実施するという方向は固めていたが、50cmメッシュの測量はその地点に樹木が生えている場合もあり問題が存在していた。そこで、2005年から実施する造山古墳の測量調査に際しては、伝統的な等高線測量とともにデジタル測量を実施する

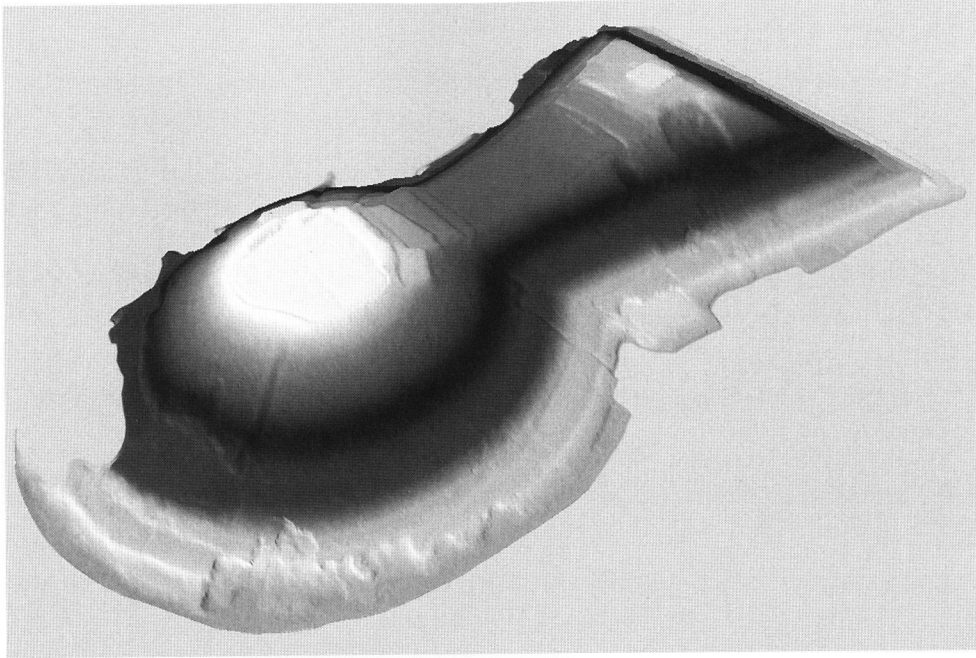


図14 造山古墳の鳥瞰図（デジタル測量による）

こととし、メッシュを設けずに必要な地点の座標を計測し、コンピュータ上でそうした点群から連続した三角形を作成して面をつくっていくという TIN の手法によって解析を行う方法を採用することにした。2005年9月の調査は、デジタル測量の試行ということで、造り出しと後円部墳頂のみを計測し、その成果にもとづいて、2006年9月と2007年9月で墳丘のデジタル測量を完成させた。

デジタル測量のデータは、国土座標にもとづく XYZ の値の集合であり、造山古墳の場合は合計120,548点を計測することとなった。計測データから造山古墳の墳形を鳥瞰図で表示したものが図14である。データはさまざまに加工することができるが、地理情報システムソフトウェアによって描いた25cm等高線図は、大規模古墳の測量図としては最も精細なものとなっている（新納編2008）。

造山古墳のデジタル測量は、GPS を用いて2cm以内の誤差で基準点を設け、そこからトータルステーションで測点を計測していくというものである。GPS はニコン・トリンブル社製の5800という機種を用いており、株式会社ジェノバ（JENOBA）による高精度位置情報サービスの VRS-RTK 観測を用いて補正を行っている。また、使用するトータルステーションは、2007年度にはニコン・トリンブル社製の Trimble S6という機種を導入した。自動追尾の機能を備えているため高速な計測が可能であり、1日で2000点を超える場合もあった。

造山古墳で用いた方法は、測量成果の質という点では現在の最高水準となっており、その点での問題点は現在のところ存在していないといえる。しかし、作業に必要な人員と時間は等高線測量とほぼ同じくらいであり、機器の操作や地理情報システムを用いた処理の技術が必要であるなど、だれでもどこでも実施できるというものではない。しかも、測量に必要な GPS やトータルステーションの価格は高額である。しかし、そのように制約は少なくないが、入手することのできたデータの質や、出力される図の精度などは十分に納得のいくものとなっている。

4. 計測データの処理

三次元計測のデータは、適切な処理を行わないと学術的に意味のある成果にならない。岡山大学

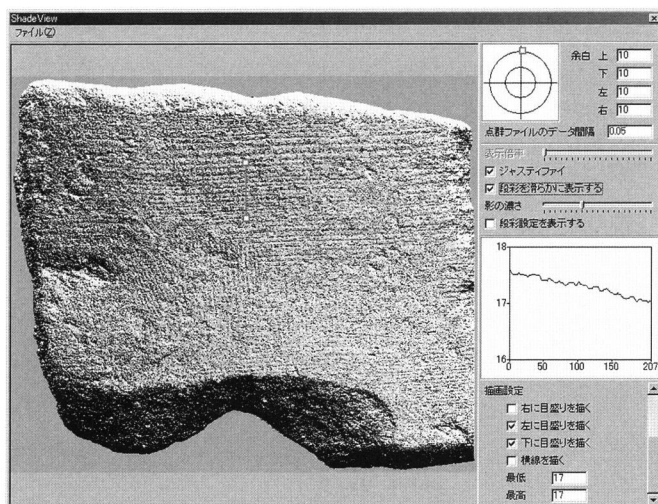


図15 ShadeView の画面

ら影をつけるとともに、指定した断面形を表示する機能をもっている。図15は、接触式三次元計測装置で計測した円筒埴輪の破片を ShadeView で表示したもので、影をつけることによってハケ目の検討が容易となり、さらに断面を表示することによってハケ目の詳細を観察することが可能である。

地理情報システムのソフトウェアとしては、アメリカのクラーク大学が開発した IDRISI のほかに、最近では UNIX 上のフリーのソフトウェアである GRASS の利用を進めている。GRASS は次のバージョンから Windows 上でも通常のソフトウェアと同じ形で動くことが予告されており、利用の拡大を期待できるかもしれない。

5. おわりに

三次元計測が普及し始めたのは、ごく最近のことであり、現状ではまだ課題がきわめて大きい。最後に、そうした課題にふれ、今後の展望を探ることにしたい。

第1の課題は、コンピュータの性能の問題である。レーザー計測などによる三次元計測は、実用的な精度を確保しようとする、データの量が莫大となり、一般的なパーソナルコンピュータの処理能力を超えている場合が多い。たとえば一辺1mの立方体の場合、1mm間隔で計測すると6面で600万点の測点が必要となってくる。各点に、小数点以下も含むXYZの座標値や色情報などをもたせると、データはたちどころに大きくなってしまふ。現在一般的な Windows コンピュータの場合、4ギガバイトのメモリの壁があり、あまり大きなデータを処理することはできない。64ビット版 Windows Vista の Ultimate または Business の場合は128ギガバイトまでメモリーを搭載することができるが、チップセットの限界から一般的なパーソナルコンピュータでは8ギガバイト程度が上限のようである。メモリーの限界は今後急速に改善されるであろうが、本格的な三次元計測と処理には現状ではまだコンピュータが追いついていないというのが実情であろう。

第2の課題は、計測機器の限界である。これまでに述べてきたように、接触式の計測機は計測速度を除くと一定程度満足のいくレベルに達しているが、流れは非接触式の計測機に移っている。三次元計測機は、核兵器の製作などに悪用される可能性があり、さまざまな制約が大きい。レーザーを用いた計測機が今後どの程度まで発達するのかは予測できないが、現状では精度の点でまだ不十分な点が少ない。現在のレベルでは、研究というよりも展示などの目的での利用や、実測のための元図としての利用などでは問題がないが、本格的な資料のアーカイブ化や研究での利用のためには、課題が

考古学研究室では、さまざまな計測データの生データを ASCII テキストファイルの形で入手し、簡易なプログラム言語である perl/tk を用いて処理を行い断面のプロットなどの画像化をおこなっている。Surfer などの表示ソフトウェアを用いて画像化している機関が多いようであるが、ソフトウェア的な処理を行った結果が画像化されるので生データの検証にはあまり適していないように思う。

その他にも、独自でプログラムの開発を行っており、そのなかで ShadeView は、三次元計測のデータに任意の角度から

大きいといわざるをえない。一部でアーカイブ化が進められている資料もあるが、遠からず再計測が必要となることは確実であろう。

第3の課題は、三次元計測結果の表示および解析ソフトウェアの開発である。考古学の分野では、さしあたっては自由に回転させて表示できる機能のほかに、任意の断面を手軽に表示できる機能が必要であると思われる。UNIX 上の地理情報システムのソフトウェアである GRASS は、lidar point cloud data（レーザー計測雲状点群データ）への対応を進めているということである（Neteler and Mitasova 2008）が、まだ機能は開発途上のようなのである。

文献

- 阿子島香 2004「中範囲理論（ミドルレンジセオリー）」安斎正人編『現代考古学事典』同成社
- 宇野隆夫 2006「日本考古学を GIS で変革したい」『GIS NEXT』第17号
- 近藤義郎編 1991『権現山51号墳 — 兵庫県揖保郡御津町 —』『権現山51号墳』刊行会
- 近藤義郎編 1992『楯築弥生墳丘墓の研究』楯築刊行会
- 新納 泉編 2008『岡山市造山古墳測量調査概報 科学研究費補助金基盤研究(B)研究成果報告書』岡山大学大学院社会文化科学研究科
- 畑 信次・高田荘爾編 2006『広島県史跡二子塚古墳発掘調査報告書 — 2002年度（平成14年度）～2005年度（平成17年度） —』福山市教育委員会
- Kohler, T. A., G. J. Gumerman and R. G. Reynolds. 2005. Simulating Ancient Societies. *Scientific American* July 2005. コーラー・グーマン・レイノルズ「バーチャル考古学 — シミュレーションで迫る古代社会」『日経サイエンス』2006年1月号
- Neteler and Mitasova. 2008. *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach, Third Edition*. Springer: New York.